

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроніки
(назва факультету, інституту)

Кафедра мікроелектроніки
(назва кафедри)

До захисту допущено
Завідувач кафедри

О. В. Борисов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»
(код і назва)

на тему: Вплив температури на параметри та характеристики п'єзоелектричного трансформатора.

Виконав : студент 4 курсу, групи ДП-52
(шифр групи)

Хиля Євгеній Вадимович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник ст. викл. Надкерничний Степан Петрович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н., Орлов А.Т.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н., Діденко Ю.В.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень
з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

групи ДП- 52 Хиля Євгеній Вадимович

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вплив температури на характеристики п'єзоелектричного трансформатора

керівник роботи Надкерничний Степан Петрович, старший викладач,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи 04 червня 2019 р.

3. Вихідні дані роботи П'єзоелектричний трансформатор потужністю до 2Вт, Вихідний струм 100 ... 200мА

4. Перелік питань, які мають бути розроблені (зміст роботи) 1.Ознайомитися з використанням та характеристиками сучасних п'єзоелектричних матеріалів. 2.Освоєння основних методів дослідження характеристик п'єзоелектричних матеріалів. 3.Ознайомлення з видами конструкцій, принципами роботи та методам побудови п'єзоелектричних трансформаторів. 4.Освоєння методів конструювання блоків живлення на основі п'єзотрансформатора. 5.Розробка конструкції п'єзотрансформатора. 6.Вимірювання характеристик п'єзотрансформатора. 7.Дослідження впливу температури на параметри та характеристики п'єзотрансформатора. 8. Обговорення результатів дослідження та написання дипломної роботи.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)_

1. Види конструкцій п'єзотрансформатора. 2. Модель схеми заміщення п'єзотрансформатора. 3. П'єзоелектричні матеріали та їх характеристики. 4. Конструкція п'єзотрансформатора та його характеристики.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план виконання роботи

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення принципів роботи п'єзоелектричних матеріалів.	28.02.19	
2.	Ознайомитися з сучасними п'єзоелектричними матеріалами	14.03.19	
3.	Проектування та виготовлення п'єзоелектричного трансформатора.	16.04.19	
4.	Дослідження частотної характеристики п'єзоелектричного трансформатора, експлуатаційних характеристик та впливу температури на його роботу	25.04.19	
5.	Освоєння основних методів створення блоків живлення.	16.05.19	
6.	Розробка схеми живлення на основі п'єзоелектричного трансформатора.	25.05.19	
7.	Обговорення результатів дослідження та написання дипломної роботи.	03.06.19	

Студент

_____ (підпис)

Є.В.Хиля

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

С.П. Надкерничний

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота викладена на 53 сторінках, вона містить 3 розділи, 16 ілюстрацій, 1 таблицю і 20 джерел в списку посилань.

Мета роботи – перевірити вплив температури на параметри та характеристики п'єзоелектричного трансформатора.

У основній частині розглянуті основні типи п'єзотрансформатори та їх використання в сучасній техніці.

Наведена теоретична інформація про еквівалентну схему, п'єзоелементи та вимірювальні параметри.

Описані методи побудови конструкцій п'єзотрансформаторів та принципи вимірів основних параметрів. В експериментальній частині приставлені виміри результатів дослідження п'єзотрансформатора.

Ключові слова: П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОР, П'ЗОКЕРАМІКА, ПРЯМИЙ ТА ОБЕРНЕНИЙ П'ЄЗОЕФЕКТИ, ДОБРОТНІСТЬ, ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ, ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ.

ABSTRACT

The diploma is presented on 53 pages, it contains 3 sections, 16 illustrations, 1 table and 20 sources in the list of references.

The purpose of the work is to check the influence of temperature on the parameters and characteristics of the piezoelectric transformer.

The main part deals with the main types of piezotransformers and their use in modern technology.

The theoretical information about the equivalent scheme, the piezoelectric elements and the measurement parameters are given.

Methods of constructing piezotransformers and joint measurement of basic parameters are described. In the experimental part, the measurements of the results of a piezotransformer study are plotted.

Keywords: PIEZOTRANSFORMATOR, P'ZOKERAMIKA, DIRECT AND PROTECTED PIEZOEFFECT, VOLUNTARY, MEASUREMENT OF PARAMETERS, TEMPERATURE IMPACT.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ, УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ТЕРМІНИ	7.
ВСТУП	8.
РОЗДІЛ 1. ВИДИ КОНСТРУКЦІЙ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА.	9.
1.1. Будова та характеристики п'єзоелектричного трансформатора.	9.
1.2. Перетворювачі напруги на основі п'єзотрансформаторів.	18.
1.3. Використання п'єзотрансформаторів.	21.
РОЗДІЛ 2. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.	27.
2.1. Властивості п'єзоелементів.	27.
2.2. Параметри п'єзоелементів.	31.
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА	42.
3.1. Розробка конструкції п'єзотрансформатора.	42.
3.2. Вимірювання параметрів п'єзотрансформатора.	47.
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.	51.
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.	52.

СКОРОЧЕННЯ, УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ТЕРМІНИ

ПТ – П'єзотрансформатор

ПЕ – П'єзоелемент

ЦТС – Цирконат - титанат свинцю

ТБ – Титанату барію

ТС – Титанату свинцю

ВСТУП

Особливою і швидко розширюється область п'єзоелектричних трансформаторів, що дозволяють ефективно замінити намотувальні трансформатори. У них пряме і зворотне перетворення електроенергії здійснюються в результаті використання прямого і зворотного п'єзоефектів. Ці пристрої працюють в резонансному режимі.

З розвиток технологій змінюються стандарти для створення блоків живлення, вони повинні бути компактні та з високим ККД (коефіцієнт корисної дії). Саме через це знову з'явилась зацікавленість в використанні п'єзотрансформаторів, оскільки на їх основі створюються широкопрофільні перетворювачі напруги та гальванічні розв'язки для пристроїв.

Найкраще ПТ показують себе в на малих та середніх потужностях до 10Вт . Оскільки займають мало місця і здатні в порівнянні з звичайними мотковими трансформаторами.

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИП РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ З ВИКОРИСТАННЯМ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРІВ.

1.1. Будова та характеристики п'єзоелектричного трансформатора.

Основні явища які застовуються в п'єзотрансформаторі: явище зворотного п'єзоефекту в секції збудника та прямого п'єзоефекту в секції генератора, в цьому і полягає його принцип дії. Можуть бути одношарові та багатошарові п'єзотрансформатори (рис.1,2). У випадку багатошарових п'єзотрансформаторів багатошаровим виготовляється збудник, а генератор залишається одношаровим. Коефіцієнт трансформації такого п'єзотрансформатора значно перевищує коефіцієнт трансформації одношарового при можливому зменшенні його розмірів. Особливістю п'єзотрансформатора є резонансний характер перетворення енергії у порівняно вузькій смузі частот, коли амплітуда внутрішньої механічної напруги досягає максимального значення.

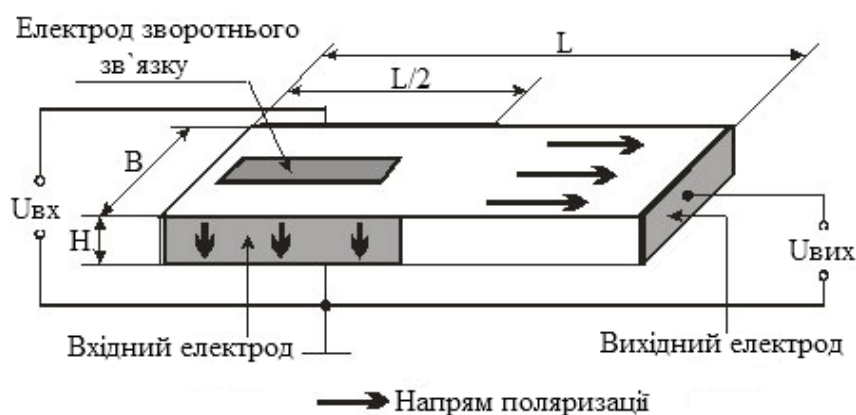


Рисунок 1. Конструкція одношарового п'єзотрансформатора.

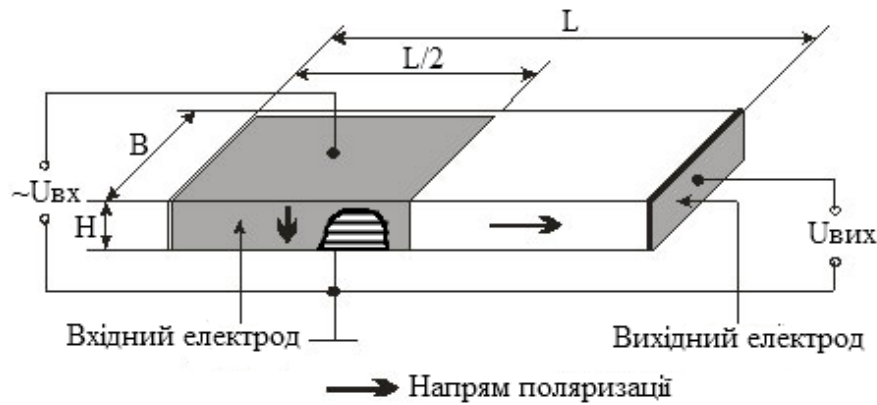


Рисунок 2. Конструкція багатошарового п'єзотрансформатора.

Еквівалентну схему п'єзотрансформатора можна представити у вигляді еквівалентних схем двох п'єзоелектричних резонаторів, один з яких є збудником, а інший – генератором. Таким чином, еквівалентна схема п'єзотрансформатора складається з трьох частин. Перша частина – електрична з входною ємністю C_{E1} , підключена до джерела живлення, третя – також є електричною з вихідною ємністю C_{E2} та індуктивним опором X_{L2} , до неї підключене навантаження. Обидві частини з'єднує між собою механічна частина у виді послідовного коливального контуру з елементами: індуктивність L_M , яка у залежності від частоти вихідного сигналу може мати ємнісний чи індуктивний характер, або ставати активною з опором R_M на частоті резонансу, ємність C_M та опір R_M . Усі частини п'єзотрансформатора з'єднані між собою ідеальними трансформаторами з входним коефіцієнтом трансформації n_1 , та вихідним коефіцієнтом трансформації n_2 . Один із трансформаторів є понижуючим, інший – підвищуючим. Методика ідентифікації еквівалентної схеми базується на розрахунку її параметрів за формулами.. При цьому враховуються дані про конструктивні особливості п'єзотрансформаторів, електричні та фізичні властивості п'єзокерамічних матеріалів, з яких вони зроблені.

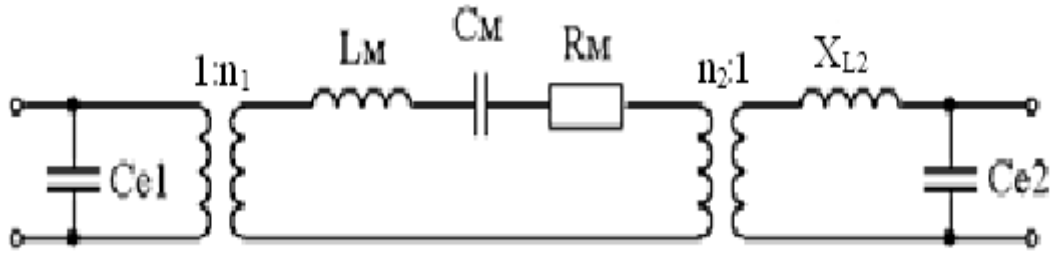


Рисунок 3. Еквівалентна схема п'єзотрансформатора поперечно-
подовжнього типу.

На основі електричного аналізу отримують основні формули для розрахунку параметрів еквівалентної схеми п'єзотрансформатора.

$$C_{e1} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - K_{31}^2) \cdot b' \cdot L'}{a'}, \quad (1)$$

$$C_{e2} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - K_{33}^2) \cdot a'' \cdot b''}{L''}, \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{e2}}, \quad (3)$$

$$K_1 = 2 \cdot b' \cdot d_{31} \cdot Y_{31}^{JO}, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{2 \cdot K_{33}^2 \cdot a'' \cdot b''}{g_{33} \cdot L''}, \quad (5)$$

$$L_M = a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho, \quad (6)$$

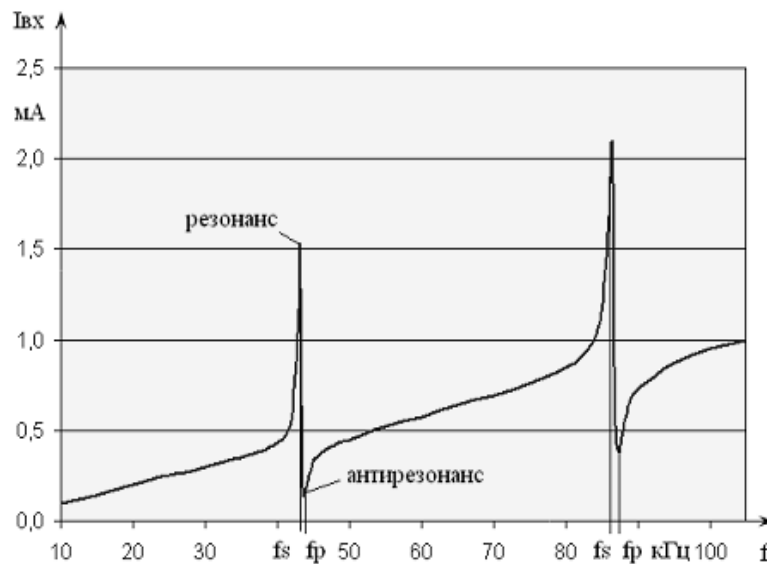
$$C_M = \frac{L'}{\pi^2 \cdot a' \cdot b' \cdot Y_{31}^{JO}}, \quad (7)$$

$$R_M = \frac{\pi \cdot a' \cdot b' \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_{31}^{JO}}}{Q_M}, \quad (8)$$

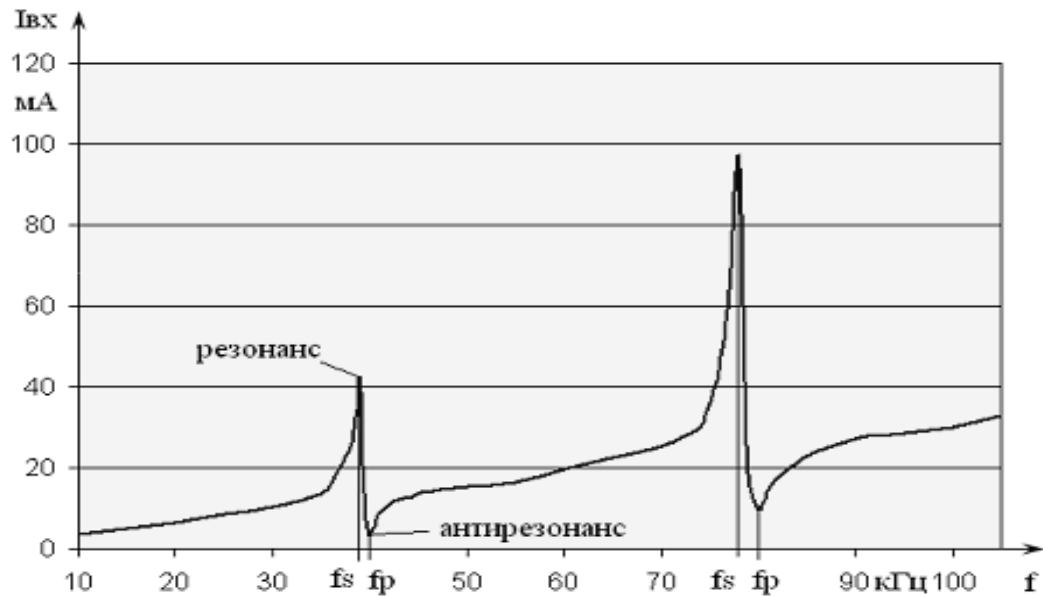
$$K_{mp} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}, \quad (9)$$

$$f_{рез} = m \cdot \frac{N_p}{L}, \quad (10)$$

Де ε_{33}^T – діелектрична проникність; K_{31} – поперечний коефіцієнт електромеханічного зв'язку; K_{33} – подовжній коефіцієнт електромеханічного зв'язку; b' , b'' – ширина збудника та генератора відповідно; L' , L'' – довжина збудника та генератора відповідно; a' , a'' – товщина збудника та генератора відповідно; ω – кругова частота; d_{31} – п'єзоелектричний модуль; Y_{31}^{10} – модуль Юнга; g_{33} – чутливість у режимі приймання; ρ – питома маса п'єзокераміки; Q_M – механічна добротність; $U_{вих}$ – амплітуда вихідної напруги; $U_{вх}$ – амплітуда вхідної напруги. Резонансна частота прямо залежить від геометрії ПТ та моди збуджених коливань згідно формули (10), де m – номер моди збуджених коливань; N – частотна постійна п'єзокераміки; L – довжина ПТ.



a)



б)

Рисунок 4. Залежності коефіцієнту трансформації від опору навантаження а) в одношаровому ТП-Р1 381002; б) в багатошаровому ТП-РМ400602.

На рис.4 показана залежність коефіцієнту трансформації від опору навантаження на частотах механічного резонансу першої та другої моди. На графіках дуже характерно виражені фізичні явища резонансу та антирезонансу, що відбуваються усередині п'єзотрансформатора. Для кожної моди коливань максимальне значення струму досягається на частоті послідовного резонансу (електричного резонансу) f_s . Найбільший коефіцієнт трансформації досягається на частоті резонансу другої моди, значення якої для кожного п'єзотрансформатора різне, що обумовлено фізичними властивостями п'єзокераміки та конструктивними особливостями приладів. Стрибок струму до мінімуму характеризує паралельний резонанс (електричний антирезонанс) на частоті f_p . Електричні ємності входних резонаторів (секцій збудників) багатошарових п'єзотрансформаторів значно перевищують ємності одношарових, що істотно збільшує провідність входного кола, цим обумовлений більший вхідний струм у багатошарових п'єзотрансформаторах. Характеристика показує, що значення коефіцієнта трансформації істотно залежить від опору навантаження. У той же час коефіцієнт перетворення в

другому режимі коливань приблизно в 2 рази більше в порівнянні з першим модом. Зниження значення опору навантаження призводить до значного зниження коефіцієнта трансформації. При високих опорах навантаження коефіцієнт трансформації є найбільшим, однак результати вимірів стають нестабільними та дуже залежать від реактивної складової електричного контуру лабораторного стенду.

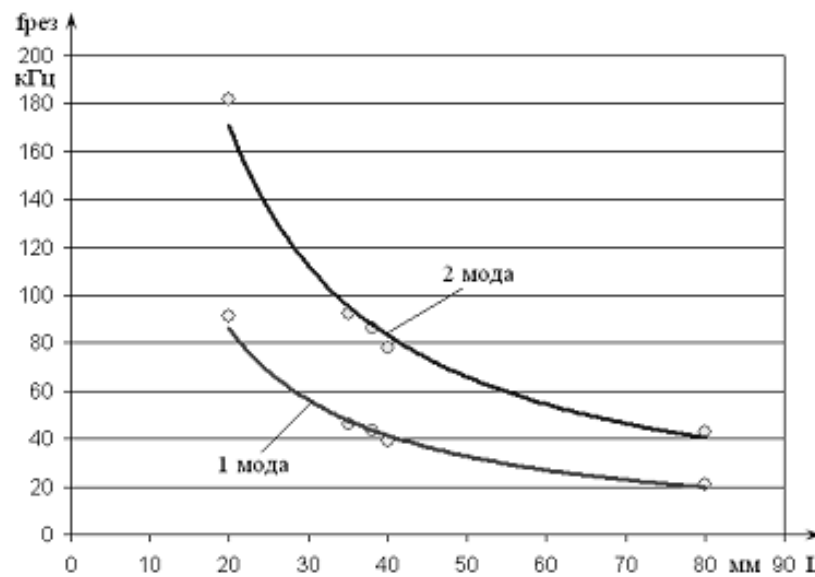


Рисунок 5. Залежність значення резонансної частоти від довжини п'єзотрансформатора.

При подальшому збільшенні опору навантаження коефіцієнт трансформації вже не збільшується, а навіть зменшується, що обумовлено енергетичними обмеженнями приладів та електричного кола.

Характер залежності, що обумовлює формула (10), підтверджує експериментальна характеристика (рис.5), яка отримана з урахуванням параметрів усіх досліджуваних п'єзотрансформаторів. З наведених вище характеристик п'єзоелектричних трансформаторів видно, що їх характеристики сильно залежать від геометричних розмірів тіла трансформатора.

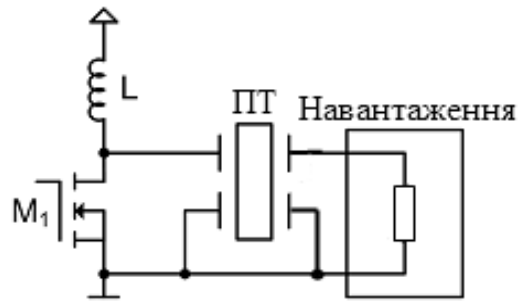
П'єзотрансформатори виготовляються з п'єзокераміки – штучного матеріалу, що має властивість п'єзоелектричного ефекту, тобто виникнення поляризації під дією механічної напруги. П'єзокерамічні матеріали мають всі властивості сегнетоелектриків. За фізичними властивостями п'єзокераміка являє собою хімічну сполуку або твердий розчин зерен кристалітів. Це твердий, хімічно інертний матеріал, який зовсім не чутливий до вологи та інших атмосферних впливів і має полікристалічну структуру. Хімічний склад являє собою складний оксид, що містить двовалентні іони свинцю або барію і четвертинні іони титану або цирконію. Шляхом зміни основного співвідношення сировини і введення добавок синтезуються п'єзокераміки різного складу, які мають певні електрофізичними і п'єзоелектричними властивостями. Найбільш широко використовується група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (цирконат-титанат свинцю). Однак використовується кераміка на основі титану, барію (ТБ) і титанату свинцю (ТК).

Таблиця 1. фізичні та електричні властивості п'єзокерамічних матеріалів.

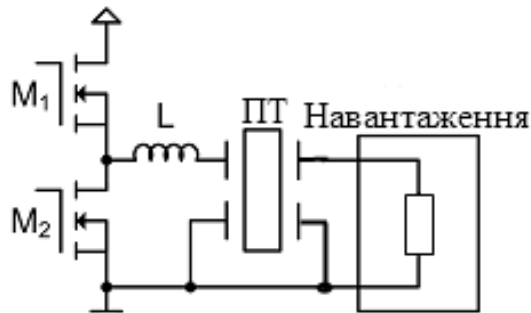
VA-500	VA-550	VA-590	VA-420	VA-440	VA-400	VA-800	VA-650	VA-750	VA-200	VA-100	Одиниця вимірювання	Символ	Параметр
ЦТС-19	ЦТС-19М	ЦТС-ТБС-1	ЦТС-24	ЦТС-24М	ЦТС-Ст-3		ЦТБ-С-3	ЦТС-НВ-1	ЦТС-35	ЦТС-22			
0,035	0,025	0,027	0,0075	0,0075	0,008	0,005	0,012	0,022	0,020	0,025	10 ⁻²	tanδ	Тангенс кута діел. втрат
0,56	0,62	0,65	0,50	0,52	0,53	0,54	0,52	0,59	0,45	0,33	1	K ₃₁	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку.
0,29	0,35	0,38	0,30	0,30	0,31	0,32	0,30	0,34	0,28	0,17	1	K ₃₃	
0,64	0,72	0,73	0,60	0,62	0,67	0,70	0,64	0,67	0,64	0,42	1	K _p	
175	183	289	100	100	122	120	158	200	80	46	10 ⁻¹² C/N	d ₃₁	П'єзоелектричний модуль
360	410	600	340	255	290	300	360	425	200	102		d ₃₃	
8,9	10,9	8,0	10,7	11,9	9,1	10,7	7,7	8,2	9,0	7,6	10 ⁻³ (V-m)/N	g ₃₁	
22,3	24,4	17,1	26,7	26,8	23,4	26,1	16,8	19,4	22,6	19,6		g ₃₃	
2,0	2,0	2,0	2,3	2,2	2,2	2,2	2,4	2,0	2,5	2,6	Hz-m	N _p	Частотна стала
2,95	3,00	2,75	3,23	3,55	3,24	3,22	3,47	2,92	3,50	3,80	10 ³ m/s	V ¹ _E	Швидкість звуку
15,8	16,3	16,0	11,2	11,5	12,6	12,8	11,1	15,3	10,5	10,0	10 ⁻¹² m ² /N	S ^E ₁₁	Пружна жорсткість
16,8	17,5	18,5	15,1	15,4	15,5	14,8	13,9	16,5	13,5	11,5		S ^E ₃₃	
0,38	0,36	0,38	0,30	0,31	0,31	0,30	0,30	0,34	0,30	0,31	1	σ	Коеф. Пуансона
		19,6	18,6		19,6		21,6				10 ⁶ N/m ²	σ _{раст}	Межа мех. міцності, не менше:
294	294	400	343		400		392					σ _{сжат}	
90	90	50	500	200	800	1300	200	57	600	750	1	Q _m	Мех. добротність
290	300	170	270	280	280	320	180	240	300	320	°C	T _k	Темп. точки Кюрі
7,60	7,60	7,55	7,40	7,55	7,40	7,40	7,20	7,30	7,40	7,40	10 ³ kg/m ³	ρ	Густина

1.2. Перетворювачі напруги на основі п'єзотрансформаторів.

П'єзотрансформатор знайшли використання у різних схемах перетворювачів напруги, серед яких найбільш популярними є двотактна (push-pull), клас-Е та напівмостова схеми як показано на рисунку 6. Двотактна схема в основному використовується для підвищуючих вторинних джерел живлення, через більш високий підвищувальний коефіцієнт і прості вимоги управління. Клас-Е і напівмостова схема більше підходять для понижуючих вторинних джерел живлення, де напівмостова схема обробляє високі рівні потужності краще, ніж Е-клас. Але всі вони страждають тим недоліком, що вимагає додаткових індуктивних компонентів для досягнення «м'якої» комутації.



а)



б)

Рисунок 6. Найбільш популярні схеми живлення на основі п'єзотрансформатора: а) Е-клас схема;
б) напівмостова схема.

В схемі push-pull напруга, яку подають на п'єзотрансформатор, підвищується в залежності від значень L_1 та L_2 , у схемі Е-класу напруга залежить від значення L , а у напівмостовій схемі напруга ділиться на два. У своїй роботі я використав напівмостову схему живлення, тому що вона найкраще підходить для виконання поставленої задачі

Специфічною різновидом високочастотних перетворювачів постійної напруги з резонансними інверторами є перетворювачі з п'єзоелектричними трансформаторами.

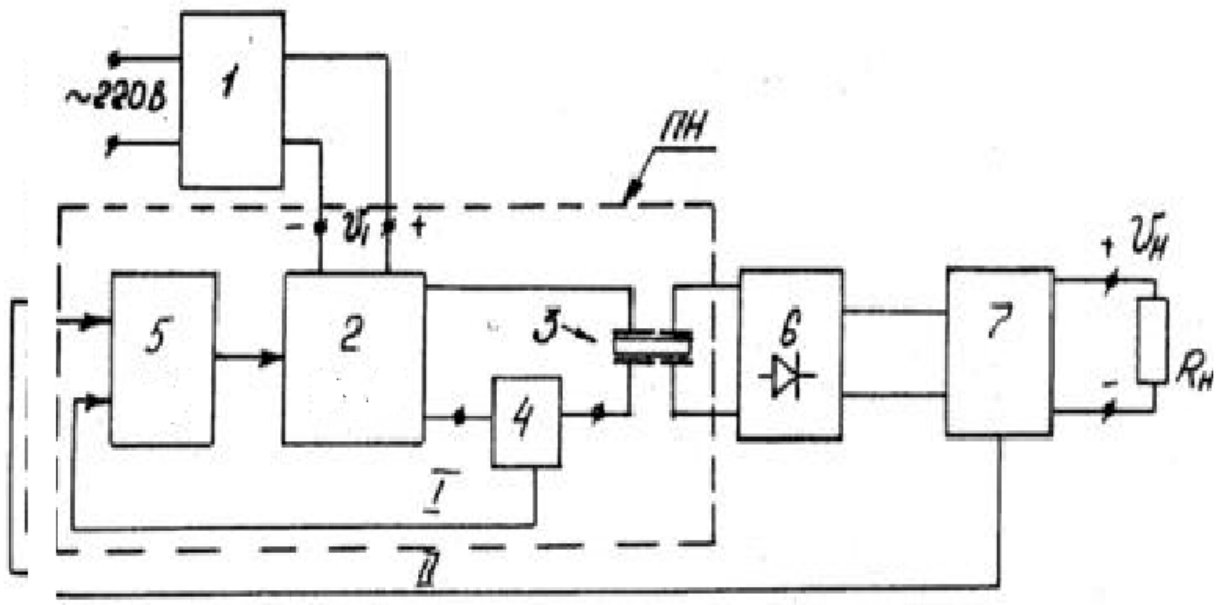


Рисунок 7. Структурна схема блоку живлення з п'єзотрансформатором.

1. Джерело напруги.
2. Перетворювач первинної напруги.
3. П'єзоелектричний трансформатор.
- 4,5. Елементи управління перетворювачем напруги.
6. Високочастотний випрямляч струму з згладжуючим фільтром.
7. Схема стабілізації.

За допомогою п'єзотрансформатора можна реалізувати вискоєфективні рішення, використовуючи меншу кількість компонентів схеми, замінюючи їх еквівалентними параметрами самого п'єзотрансформатора.

1.3. Використання п'єзотрансформаторів.

Трансформатори називаються статичними компонентами, які перетворюють електричну енергію одного значення в електричну енергію іншого значення. Перетворення можливо тільки при змінній напрузі. Конструктивно трансформатори мають намагнічені дроти, які намотують дроти. Типи і мітки магнітних ліній вибираються в залежності від частоти, заданого діапазону температур, робочого циклу та інших факторів.

Високочастотні трансформаторні лінії зазвичай складаються з низькочастотних феритів - трансформаторних сталей і пермаллозов. Для забезпечення високої напруги між обмотками прокладається ізоляція. Обмотка двохобмотувальні трансформатора, на яку подається напруга, називається первинною, а ту, з якої знята напруга, - вторинною. Якщо напруга змінного струму на первинній обмотці менше, ніж напруга на вторинній обмотці, це називається таким трансформатором, котрий підвищує.

А якщо навпаки - то вони називаються знижувальними. Якщо частина енергії первинної обмотки не досягає вторинної обмотки через магнітну ланцюг, а через електричне з'єднання, то це автотрансформатор.

Є сигнальні і силові трансформатори. Сигнальні трансформатори призначені для передачі сигналів з мінімальними спотвореннями. Буває, що сигнальні трансформатори використовуються для гальванічної розв'язки ланцюгів. Силові трансформатори потрібні в пристроях, які живлять електроапаратуру, яка з якоїсь причини вони не може бути підключена безпосередньо до джерела живлення, наприклад, коли значення напруги не співпадають.

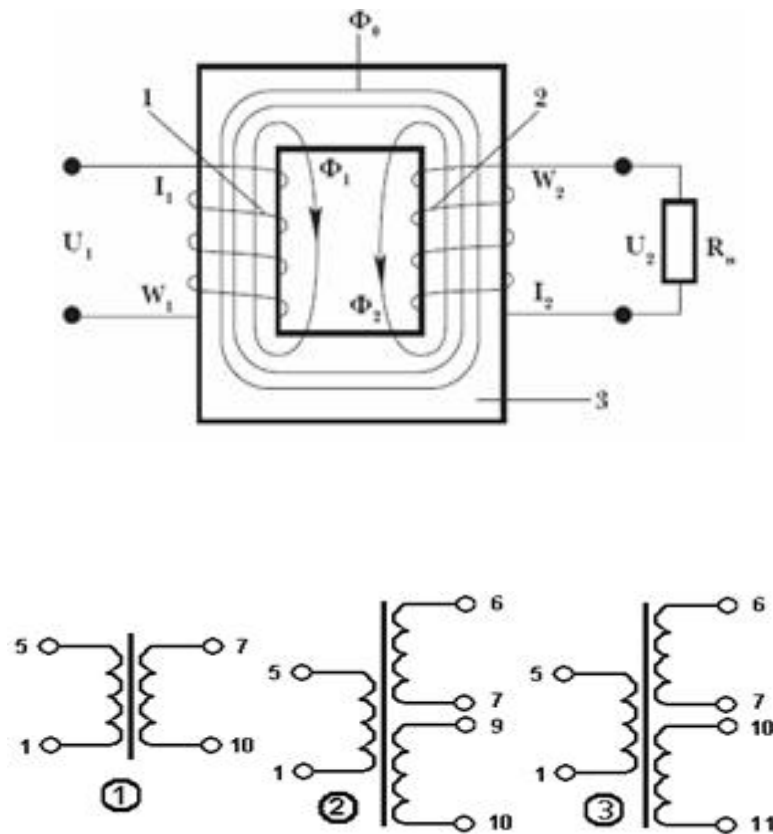


Рисунок 8. Принцип роботи трансформатора і його електрична схема

Промисловість також виробляє п'єзотрансформатор. Ці компоненти не мають обмоток, і їх принцип дії заснований на використанні п'єзоелектричного ефекту. Схематично пристрій п'єзотрансформатор показано на фіг.6, де пояснюється, що це п'єзоелектричний перетворювач в формі чотириполюсника, який має тільки один електричний вхід і вихід.

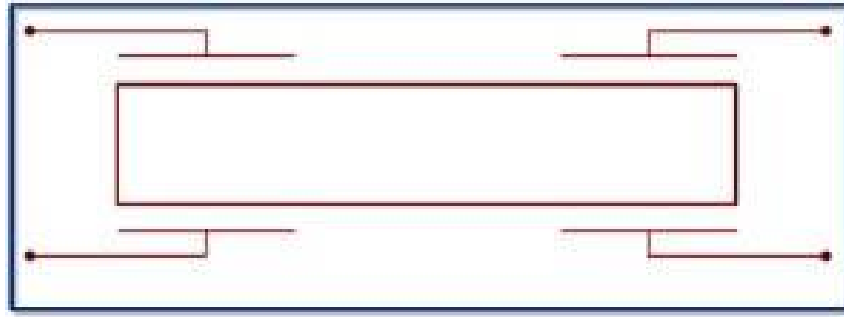


Рисунок 9. П'єзоелектричний трансформатор та принцип його дії

Дія п'єзотрансформатора на основі використання прямих і зворотних п'єзоелектричних ефектів. Напруга, прикладена до вхідних електродів п'єзоелектричного напруги перетворювача, заподіяної в результаті розвороту п'єзоефекту деформація загального обсягу п'єзоелектричного перетворювача і електричного (вторинного) напруги відбувається за рахунок прямого п'єзоелектричного ефекту на виході до електродів.

У п'єзотрансформатор відбувається подвійне перетворення енергії - електрично в механічну, а потім механічно в електричну. Як і електромагнітний трансформатор, п'єзотрансформатор використовується для перетворення електричної напруги. Вибираючи розмір електродів і їх положення, можна отримати різні значення коефіцієнта трансформації.

П'єзотрансформатор зазвичай використовується в резонансному режимі, який досягає більш високих значень коефіцієнта перетворення (порядку декількох сотень). П'єзотрансформатор використовується у вторинних високовольтних джерелах живлення.

П'єзотрансформатор складається з кристала речовини з п'єзоелектричним ефектом, в якого срібні електроди, що здатні до оборотних механічних деформацій під дією електричного поля. До таких речовин відносяться титанат барію, кварц, турмалін та інші.

П'єзотрансформатор може працювати у вузькій смузі частот, де можна спостерігати резонансні явища. Прикріплення п'єзотрансформатора відбувається за допомогою м'яких затискачів або затискачів в точках, в яких амплітуда вигину п'єзопластінчатих пластин мінімальна. Пікова потужність п'єзотрансформаторів зазвичай невелика і часто становить всього від 5 до 30 Вт.

Особливою і швидко розширюється областю застосування в останні роки стало використання п'єзоелектричних трансформаторів, що дозволяють ефективно замінити намотувальні трансформатори. У них пряме і зворотне перетворення електроенергії здійснюються в результаті використання прямого і зворотного п'єзоефектів. Ці пристрої працюють в резонансному режимі.

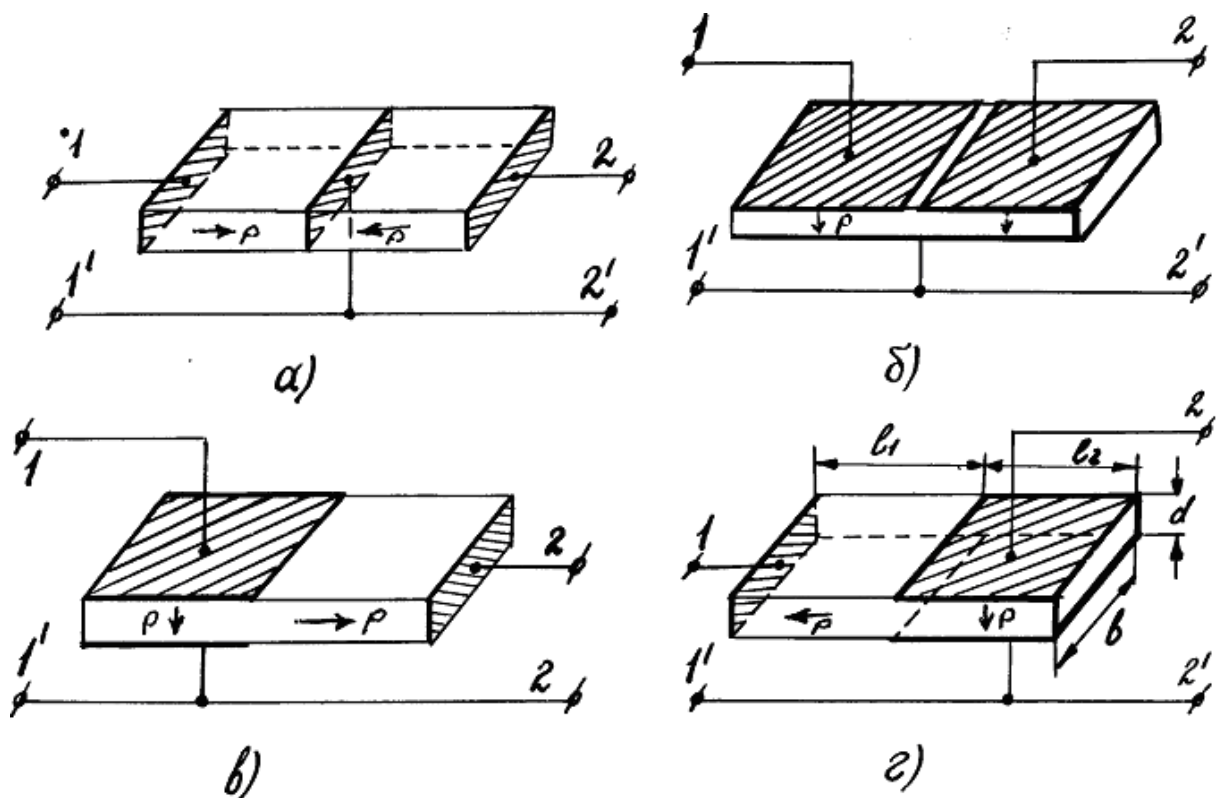


Рисунок 10. Типові конструкції п'єзоелектричних трансформаторів.

Від електромагнітних трансформаторів їх відрізняє шлях перетворення енергії: електрична - акустична - електрична, що призводить до суттєвого

спрощення конструкції п'єзотрансформатор (рис. 6), в якому відсутні будь-які проводи або обмотки. П'єзоелектрична пластинка в найпростішому випадку має дві пари електродів, що утворюють збудник і генератор.

Використовуючи зворотний п'єзоефект, збудник створює в платівці механічну деформацію, що охоплює у вигляді акустичної хвилі весь обсяг п'єзоелемента (п'єзотрансформатор працюють в режимі акустичного резонансу). У генераторної секції п'єзотрансформатор в результаті прямого п'єзоефекту виникає змінний сигнал, гальванічно розділений зі вхідною напругою.

Найбільш загальною характеристикою п'єзотрансформатор є величина так званої п'єзодобротності, що визначає їх коефіцієнт корисної дії

$$G_p = K_{ij} Q_M \quad (11)$$

В якості робочого матеріалу для п'єзотрансформатор використовують різні види п'єзоелектричної кераміки, оскільки саме п'єзокераміка дозволяє конструктивно об'єднувати в одній пластині (диску, стрижні) обидва елементи п'єзотрансформатор - збудник і генератор.

Це обумовлено технологічною можливістю диференційованого завдання орієнтації вектора п'єзоелектричної поляризації в процесі виготовлення відповідних моноблочних керамічних п'єзоелементів.

Використання сучасних п'єзокерамічних матеріалів дозволяє домогтися коефіцієнта трансформації по напрузі понад 1000, що забезпечує отримання вихідних напруг до 10 кВ. Крім режиму трансформатора напруги ці пристрої успішно застосовуються і як трансформатори струму.

Прийнята така класифікація п'єзотрансформатор по робочій частоті:

1) низькочастотні - на резонансну частоту $f_p < 10$ кГц, в тому числі на промислові частоти 1000, 400 і 50 Гц. У них використовуються низькочастотні п'єзоелементи, що працюють на коливаннях вигину, біморфний або багатошарові, вільні або механічно навантажені для зменшення робочої частоти;

2) середньочастотні - на діапазон $f_p = 10 - 500$ кГц, з одношаровими або багатошаровими п'єзоелементами, що працюють на поздовжніх акустичних коливаннях основний або вищих мод;

3) високочастотні на $f_p > 500$ кГц. У них використовуються тонкі п'єзопластини на вищих модах поздовжніх акустичних коливань по ширині або багатошарові конструкції, що працюють на коливаннях уздовж товщини п'єзоелемента.

За потужністю, що передається на навантаження, розрізняють такі конструкції п'єзотрансформатор:

1) малопотужні (до 1 Вт); в них використовуються одношарові п'єзоелементи з власною масою менше 1 г;

2) середньої потужності (від 1 до 50 Вт); це однокасетні п'єзотрансформатор, що містять 1 - 6 п'єзоелементів;

3) великої потужності (більше 50 Вт); являють собою складові багатокасетні п'єзотрансформатор.

Питома передана потужність п'єзотрансформатор становить 1-10 Вт / г або 15-75 Вт / см² при ККД, що досягає 90 - 98%. Основною областю застосування п'єзотрансформатор є їх використання у вторинних джерелах живлення радіоелектронних пристроїв.

РОЗДІЛ 2. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. Властивості п'єзоелементів.

П'єзоелемент - електромеханічний перетворювач, що виготовляється з п'єзоелектричних матеріалів, певної форми і орієнтації відносно кристалографічних осей, за допомогою якого механічна енергія перетворюється в електричну (прямий п'єзоефект), а електрична в механічну (зворотний п'єзоефект). Конструктивно п'єзоелемент вдає із себе п'єзокераміка з нанесеними електродами. П'єзоелементи можуть бути різноманітної форми: у вигляді дисків, кілець, трубок, пластин, сфер та ін. Для вібраторів і генераторів п'єзоелементи об'єднують в п'єзостек, щоб досягти кращих характеристик.

П'єзоелектричні речовини (п'єзоелектрики), зокрема п'єзокераміка, має властивість, що при деформації під дією зовнішнього механічного тиску на їх поверхні виникають електричні заряди. Цей ефект називається прямим п'єзоелектричним ефектом і був відкритий в 1880 р братами Кюрі. Незабаром після цього (в 1881 р) був підтверджений і зворотний п'єзоефект, а саме що така речовина, розташоване між двома електродами, реагує на прикладену до нього електричну напругу зміною своєї форми. Перший ефект в даний час використовується для вимірювань, а другий - для збудження механічних тисків, деформацій і коливань. Більш детальні дослідження п'єзоефекту показали, що його можна пояснити властивістю елементарної комірки структури матеріалу. При цьому елементарна осередок є найменшою симетричною одиницею матеріалу, з якої шляхом її багаторазового повторення можна отримати мікроскопічний кристал. Було показано, що необхідною передумовою для появи п'єзоефекту є відсутність центру симетрії в елементарній осередку.

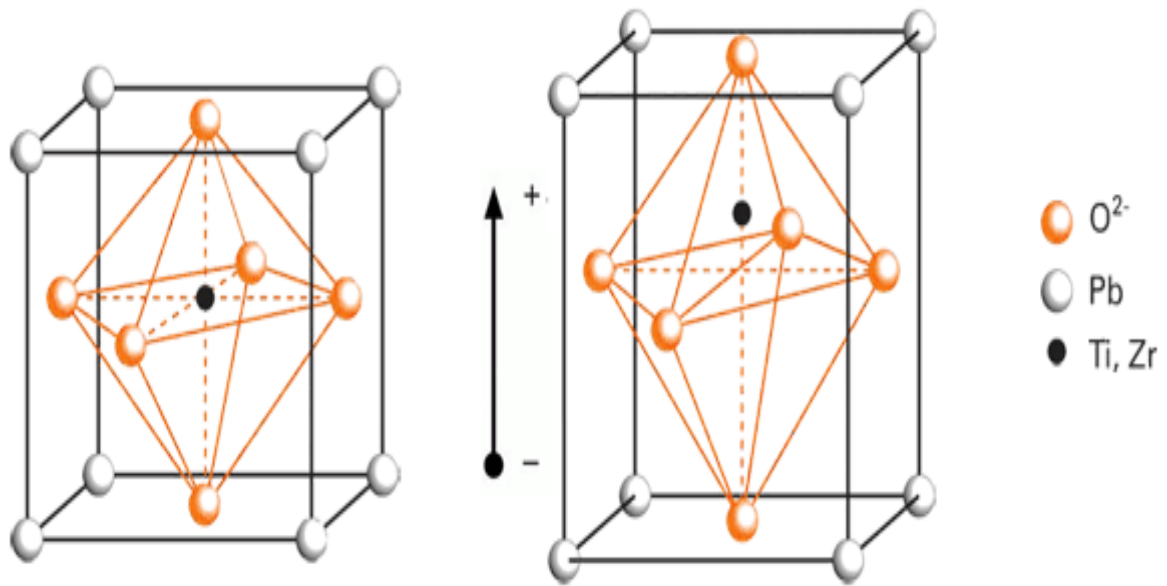


Рисунок 11. Елементарна комірка цирконата тітоната свинцю (ЦТС) при температурі вище точки Кюрі (зліва) і при температурі нижче точки Кюрі (праворуч)

Тут можна коротко пояснити п'єзоелектричний ефект на прикладі титанату барію, часто застосовується п'єзоелектричний кераміки з порівняно простою конструкцією елементарного осередку. Титанат барію BaTiO_3 , як і багато інших п'єзокерамічні речовини, аналогічний за структурою перовскиту (CaTiO_3), за яким і названо цей клас матеріалів. Елементарна комірка при температурах вище, критичної, яка називається також точкою Кюрі, є кубічної. Якщо температура нижче цієї критичної, то елементарна комірка Тетрагонально спотворюється у напрямку до однієї з крайок.

В результаті змінюються і відстані між позитивно і негативно зарядженими іонами (рисунок 1, для BaTiO_3 замість Pb - Ba). Зсув іонів з їх первинного положення дуже мало: воно становить кілька відсотків параметра елементарної комірки. Однак такий зсув призводить до поділу центрів тяжіння зарядів всередині осередку, так що утворюється електричний дипольний момент. За енергетичним умовам диполі сусідніх елементарних осередків

кристала упорядковуються по областям в одинаковому напрямку, утворюючи так звані домени.

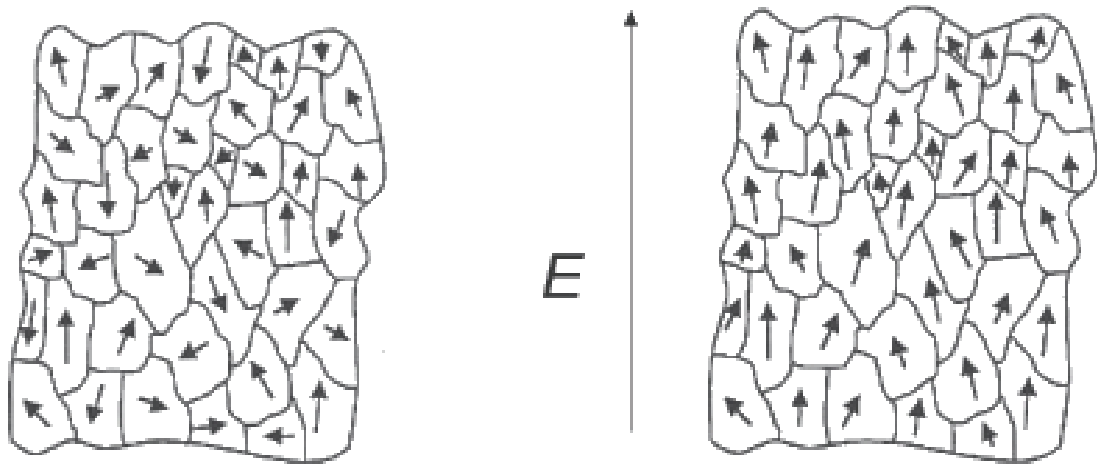


Рисунок 12. Невпорядкована поляризація (зліва) і впорядкована поляризація доменів при накладенні сильного електричного поля (праворуч)

Напрямку поляризації доменів розподіляються в полікристалічній структурі по статичному закону. Таким чином, неупорядковані скупчення окремих мікрочастин в структурі речовини, які утворюються тільки в спеченій кераміці, в макроскопічному сенсі взагалі не можуть давати ніякої п'єзоелектричного ефекту. Тільки після так званого процесу поляризації, в якому при накладенні сильного електричного поля на кераміку відбувається вирівнювання можливо більшого числа доменів паралельно один одному, вдається використовувати п'єзоелектричні властивості елементарних осередків

Поляризація зазвичай проводиться при температурі трохи нижче температури Кюрі, щоб полегшити орієнтацію доменів. Після охолодження це упорядкований стан залишається стабільним.

Механічне стиснення або розтягнення, чинне на п'єзоелектричну пластину паралельно напрямку поляризації, призводить до деформації всіх елементарних осередків. При цьому центри тяжкості зарядів взаємно зміщуються всередині

елементарних осередків, які розташовані тепер переважно паралельно, і в результаті виходить заряд на поверхні .

Зв'язок між прикладеною силою і результуючим відповіддю п'єзoeлементa залежить від: п'єзoeлектричних властивостей п'єзoкeрамiки, розміру і форм зразка, напрямлення електричного і механічного збудження. За своєю природою п'єзoeлектричні матеріали є анізотропними кристалами. Малюнок 3 показує різні напрямки і осі орієнтації п'єзoeлектричного матеріалу. Осі 1, 2 і 3 є відповідними аналогами осей X, Y, Z класичної ортогональної системи координат, в той час як осі 4, 5, і 6 визначають осі обертання. Напрямок осі 3 є напрямком поляризації . Цей напрямок встановлюється під час виробництва за допомогою високого постійної напруги, яке створюється між електродами.

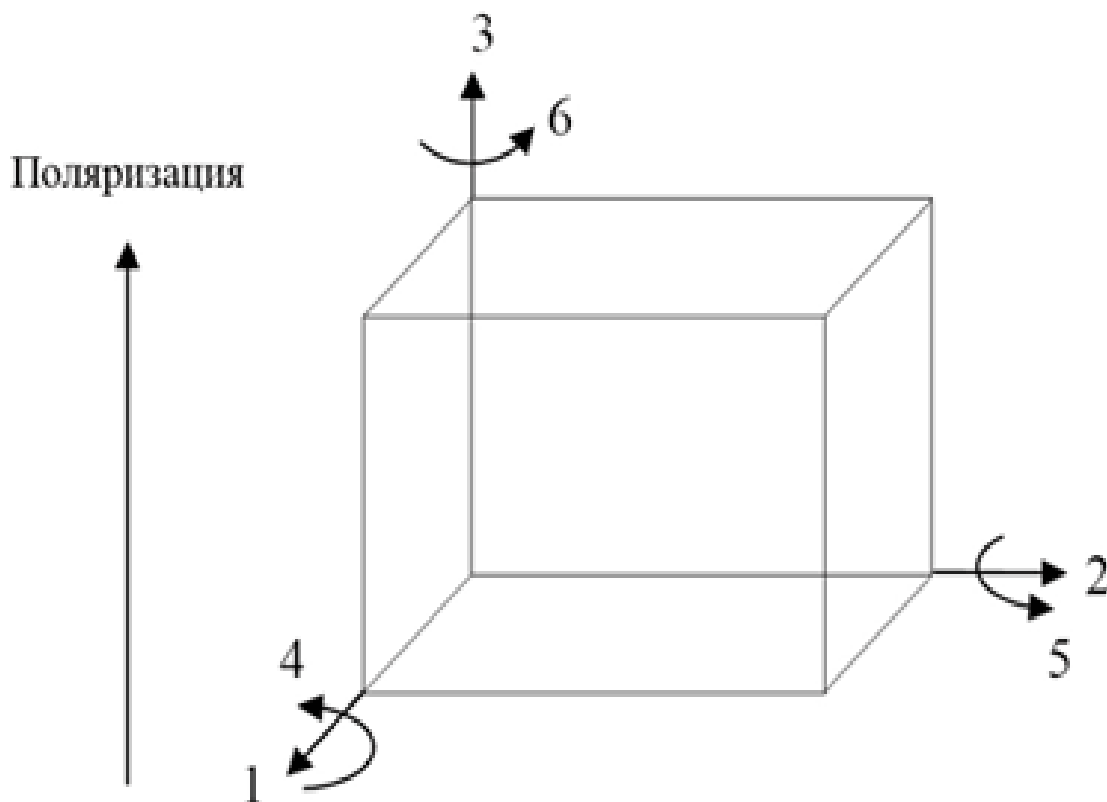


Рисунок 13. Напрямок та орієнтація осей п'єзoeлектричного матеріалу

2.2. Параметри п'єзоелементів

П'єзоелемент характеризується наступними властивостями:

- а) Відотною діелектричної постійної
- б) Резонансної частотою
- в) Коефіцієнтами електромеханічного зв'язку
- г) Пружними постійними
- д) п'єзоелектричні постійними
- е) Коефіцієнтом Пуассона
- ж) температурний коефіцієнт
- з) Швидкістю старіння
- і) Механічна добротністю
- к) Температурою Кюрі
- л) Щільністю

а) Відносні діелектричні постійні

Відносна діелектрична постійна є відношенням діелектричної проникності матеріалу (в цьому випадку ϵ_{33}^T і ϵ_{11}^T) до діелектричної проникності вакууму (ϵ_0)

$$\frac{\epsilon_{33}^{T(S)}}{\epsilon_0} \text{ і } \frac{\epsilon_{11}^{T(S)}}{\epsilon_0}, \quad (12)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф / м

Верхній індекс слугує для показу граничних умов, які діють на матеріал в процесі визначення значення відносної діелектричної постійної. Зокрема індекс Т (в нашому випадку) говорить про те, що вимірюємо діелектричну постійну на вільному (не затиснуті) зразку. А індекс S показує, що п'єзокераміка знаходиться при постійній деформації (в затиснутому стані).

Перший нижній індекс показує напрямок діелектричного зсуву, а другий - електричного поля. Формула розрахунку відносної діелектричної постійної наступна:

$$\frac{\epsilon_{ij}^T}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0^2 S}, \quad (13)$$

де ϵ_{ij}^T - діелектрична проникність (одна з двох ϵ_{11}^T або ϵ_{33}^T), Ф / м

t - відстань між електродами, м,

S - площа електрода, м²,

C - ємність, Ф

б) Резонансної частотою

Власна частота пластини по товщині f_0 обчислюється за такою формулою

$$f_0 = \frac{c}{2t}, \quad (14)$$

формула власної частоти, (14) де c - швидкість звуку в матеріалі, м / с

в) Коефіцієнтами електромеханічного зв'язку

Коефіцієнти електромеханічного зв'язку k_p , k_{33} , k_{15} , k_t і k_{31} показують здатність п'єзoeлементa перетворення енергії з механічної в електричну і навпаки. Квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку визначається як відношення накопиченої перетвореної енергії одного виду (механічної або електричної) до вхідних енергії другого виду (електричної або механічної). Індекс показує відносні напрямки механічних і електричних величин і вид коливань.

Вони можуть бути пов'язані з модою коливань простого перетворювача певної форми. k_p означає взаємозв'язок електричної і механічної енергії в тонкому круглому диску, поляризованому по товщині і що коливається в радіальному напрямку - планарная мода k_{31} відноситься до довгого тонкого бруска з електродами на довгій поверхні. Вид коливань - розтяг по довжині k_t

пов'язаний з тонким диском або пластиною і визначає розтягування стиснення по товщині. k33 відповідає довгому тонкому бруска з електродами на його кінцях і поляризованому по довжині.

Вид коливань - розтягування стиснення по довжині k15 описує енергію перетворену в зсувні коливання по товщині [.

$$k_t = \sqrt{\frac{f_a - f_r}{0,405(2f_a - f_r)}}, \quad (15)$$

де f_r – резонансна частота, Гц,

,

f_a – антирезонансна частота, Гц

Для вимірю цих частот зазвичай використовується аналізатор імпедансу, який дозволяє отримати та показати, як залежить опір від частоти п'єзокераміки. За своєю природою, виникнення резонансної частоти відбувається в випадку створення в системі дуже малого опору, в цей же час антирезонансна частота відбувається в випадку коли система приймає дуже великий опір. Резонансною (f_r) вважається частота при найменшому опорі, а антирезонансною (f_a) – коли опір приймає найбільшу величину.

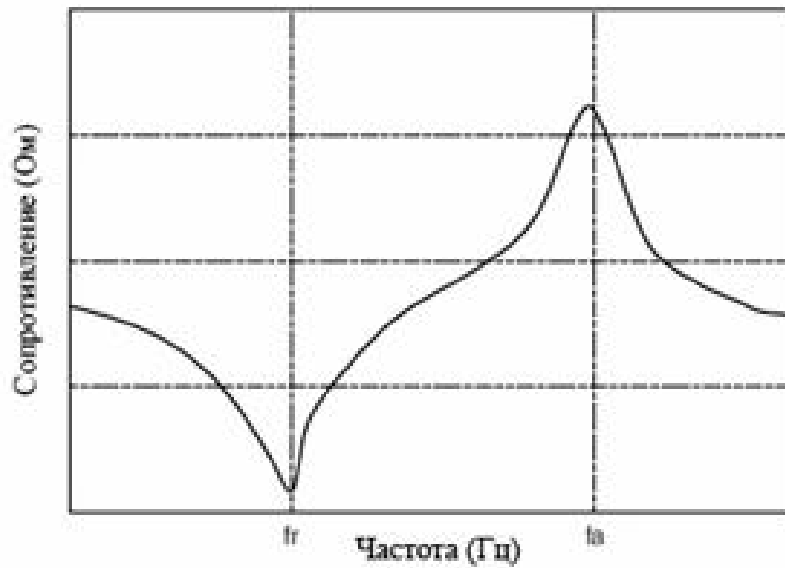


Рисунок 14. Залежність опору від частоти у п'єзокераміки

г) Пружними постійними

Пружні властивості п'єзоелектричних матеріалів характеризуються пружної піддатливості ($s_{ij}^{E,D}$) або пружними твердостями ($c_{ij}^{E,D}$). Пружна податливість визначає величину деформації виникає під впливом прикладеного механічного напруження. З огляду на те, що під впливом механічної напруги кераміка породжує електричний відповідь, який протидіє результуючої деформації, ефективний модуль Юнга при короткому замиканні електродів менше ніж при холостому ході. В різних напрямках жорсткість різна, тому для того щоб, точно визначити величини потрібно вказувати як і електричні, так і механічні умови. Верхній індекс E говорить про те, що виміри відбуваються при короткому замиканні (постійне електричне поле). У той час як, індекс D вказує на граничну умову - постійне електричне зміщення (індукція), тобто виміри відбуваються при холостому ході. Напрямок деформації показує перша нижня цифра, а напрям механічної напруги-друга.

д) П'єзоелектричні постійними

П'єзоелектричний модуль d - відношення механічної деформації до прикладеному електричному полю (Кл / Н).

$$d_{33} = \frac{\Delta x_s}{U_s}, \quad (16)$$

де Δx_s - зміна товщини пластини, м,

U_s - прикладена напруга, В

Варто пам'ятати, що при збільшенні значення d_{ij} призводять до збільшення механічних зсувів, що зазвичай використовується для проектування ультразвукових перетворювачів. d_{33} використовують, коли сила прикладена в напрямку осі поляризації d_{31} використовують, коли сила спрямована під прямим кутом до осі поляризації, при цьому заряд виникає на електродах, так само як і в попередньому випадку d_{15} показує, що заряд накопичується на електродах, які знаходяться під прямим кутом до початкових поляризуючим електродів і що одержувані механічні коливання є зсувними.

П'єзоелектрична константа тиску g_{ij} - відношення отриманого напруги до прикладеному тиску.

$$U_e = g_{33} dp_x, \quad (17)$$

де U_e - отримане напруга, В,

d - товщина, м,

p_x - прикладена тиск, Па.

Індекс "33" показує, що електричне поле і механічне напруження спрямовані по осі поляризації. Індекс "31" означає, що тиск прикладається під прямим кутом до осі поляризації, при цьому напруга знімається з тих же самих електродів, що і в разі "33". Індекс "15" має на увазі, що прикладена напруга є зсувними і результуюче електричне поле перпендикулярно до осі поляризації. Високі значення g_{ij} веде до великих вихідним напруженням, що є бажаним для сенсорів

е) Коефіцієнтом Пуассона

Коефіцієнт Пуассона - це відношення відносної поперечного стиснення до відповідного відносного поздовжнього подовження

$$\mu = - \frac{\Delta a \cdot l}{\Delta l \cdot a}, \quad (18)$$

де μ - коефіцієнт Пуассона,

Δa - абсолютне збільшення товщини, м,

a - товщина після деформації, м,

Δl - абсолютне збільшення довжини, м,

l - довжина після деформації, м

ж) Температурний коефіцієнт

Температурний коефіцієнт показує зміну різних властивостей матеріалу (резонансна частота, ємність, розміри) при зміні температури

$$TKЧ = \frac{1}{\Delta t} \frac{f(t_1) - f(t_2)}{f_{20}} \cdot 10^6 \quad (19)$$

де ТКЧ - температурний коефіцієнт резонансної частоти, ppm / °C, $f(t_1)$ - резонансна частота при температурі t_1 , Гц, $f(t_2)$ - резонансна частота при температурі t_2 , Гц, f_{20} - резонансна частота при температурі 20°C, Гц, Δt - різниця температур $\Delta t = t_2 - t_1$, °C

$$TKE = \frac{1}{\Delta t} \frac{C(t_1) - C(t_2)}{C_{20}} \cdot 10^6 \quad (20)$$

де TKE - температурний коефіцієнт ємності, ppm / °C, $C(t_1)$ - ємність при

температурі t_1 , Ф, С (t_2) - ємність при температурі t_2 , Ф, С20 - ємність при температурі 20°C, Ф

$$TKLP = \frac{1}{\Delta t} \frac{l(t_1) - l(t_2)}{l_{20}} \cdot 10^6 \quad (21)$$

де ТКЛР - температурний коефіцієнт лінійного розширення, ppm / °C, $l(t_1)$ - довжина при температурі t_1 , м, $l(t_2)$ - довжина при температурі t_2 , м, l_{20} - довжина при температурі 20°C, м

з) Швидкістю старіння

Швидкість старіння це показник зміни резонансної частоти і ємності з часом. Щоб обчислити цю швидкість, після поляризації електроди перетворювача з'єднуються разом, і зразок нагрівається певний період часу. Проводяться виміри резонансної частоти і ємності кожні 2n (1,2,4 і 8) днів. Швидкість старіння обчислюється за такою формулою :

$$(AR) = \frac{1}{\log t_2 - \log t_1} \frac{X_{t_2} - X_{t_1}}{X_{t_1}} \quad (22)$$

де AR - швидкість старіння для резонансної частоти або ємності,

t_1, t_2 - число днів після поляризації,

X_{t_1}, X_{t_2} - резонансна частота або ємність через t_1 і t_2 днів після поляризації

i) Механічна добротність

Добротність - кількісна характеристика резонансних властивостей коливальних систем, яка вказує у скільки разів амплітуда вимушених коливань при резонансі перевищує амплітуду вимушених коливань на частоті багато нижче резонансної при однаковій амплітуді збудливою сили . Добротність дорівнює відношенню власної частоти ω резонансної системи до ширини $\Delta \omega$ частотної смуги, на кордонах якої енергія системи при вимушених коливаннях вдвічі менше енергії на резонансній частоті .

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C (f_a^2 - f_r^2)}, \quad (23)$$

де Q_m - механічна добротність,

f_r - резонансна частота, Гц,

f_a - антирезонансна частота, Гц,

Z_r - опір при резонансі, Ом,

C - ємність, Ф

к) Температурою Кюрі

Температура Кюрі - це температура при перевищення якої п'єзоелектричний матеріал втрачає свої властивості.

Більшість складів п'єзокераміки засноване на хімічних сполуках з формулою ABO_3 (напр., $BaTiO_3$, $PbTiO_3$) з кристалічною структурою типу перовскіту і різних твердих розчинів на їх основі (наприклад, системи $BaTiO_3 - CaTiO_3$, $BaTiO_3 - CaTiO_3 - CoCO_3$, $NaNbO_3 - KNbO_3$). Особливо широко використовуються в якості п'єзоелектричних матеріалів склади системи $PbTiO_3 - PbZrO_3$ (т. Зв. Система PZT, або ЦТС). Практичний інтерес представляє також ряд з'єднань з формулою AB_2O_6 , напр. $PbNb_2O_6$, що мають досить високу Кюрі точку ($\sim 570^\circ C$), що дозволяє створювати п'єзоелементи для роботи при високих температурах.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА

3.1. Розробка конструкції п'єзотрансформатора.

Розрахунок п'єзотрансформаторів для вторинних джерел живлення можна розділити на дві частини.

1. Виходячи з технічного завдання на розробку джерела живлення та з урахуванням способу включення п'єзотрансформатора в схему джерела живлення визначаються вимоги до ПТ і проводиться розрахунок його електричних параметрів.

2. Вибирається марка пьезокерамического матеріалу і виконується конструктивний розрахунок ПТ. Застосуємо цю методику на прикладі розрахунку конструкції п'єзотрансформатора для перетворювача напруги.

1. За технічним завданням на вхід перетворювач напруги надходить напруга мережі $U_{\mu} = 187 \div 242 \text{ В}$ частотою 50 ± 1 Гц. Перетворювальна частина перетворювача напруги живиться від випрямленої напруги $U_{c=} \approx U_{\mu} \cdot \sqrt{2}$. Перетворювальна частина перетворювача напруги являє собою напівмостову схему, що перетворює постійну напругу $U_{c=}$ в змінну високочастотну типу "Меандр".

До виходу підсилювача підключений пьезотрансформатор. Діюче значення напруги першої гармоніки на вході ПТ $U_{ex} = U_{c=} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi}$

Якщо врахувати наявність пульсацій після випрямлення, падіння напруги на випрямлячі ΔU_{ϵ} і на транзисторах напівмостової схеми ΔU_T , то отримаємо в середньому

$$U_{ex} = \left(U_a \cdot \sqrt{2} - \Delta U_{\epsilon} - 2 \cdot \Delta U_T \right) \cdot \left(1 - \frac{K_n}{2} \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \quad (24)$$

Мінімальне значення напруги на вході ПТ буде

$$U_{\min \text{ вх}} = (U_{\min a} \cdot \sqrt{2} - \Delta U_{\text{е}} - 2\Delta U_T) \cdot (1 - K_n) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \quad (25)$$

а максимальне

$$U_{\max \text{ вх}} = (U_{\max a} \cdot \sqrt{2} - \Delta U_{\text{е}} - 2\Delta U_T) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \quad (26)$$

де: $U_{\max a}, U_{\min a}$ – найбільше і найменше значення напруги живильної мережі.

K_n – коефіцієнт пульсацій, який визначається як відношення амплітуди пульсацій до величини випрямленої напруги.

Підставивши чисельні значення вхідних параметрів, у тому числі $\Delta U_{\text{е}} = 2 \text{ В}$ (для MB4S); $\Delta U_T = 1,5 \text{ В}$ (для FQS4901); $K_n = 0,1$

визначимо діапазон зміни напруги на вході пьезотрансформатора:

$$U_{\text{вх}} = 105 \div 152 \text{ В}$$

для $U_a = 220 \text{ В}$ з маємо

$$U_{\text{вх}} = 131 \text{ В}$$

І з урахуванням максимального і мінімального відхилення вхідна напруга ПТ запишеться у вигляді

$$U_{\text{вх}} = 131 \text{ В} \begin{matrix} +16\% \\ -20\% \end{matrix}$$

Еквівалентний опір навантаження ПТ по змінному струмі обчислюється за формулою

$$R_{\text{навант}} = R_n \cdot \frac{\eta_{\text{е}}}{K_{\text{е}}^2} = 301 \text{ Ом}$$

З формули $P_{MT} = P_{H \max} \cdot \eta_{\text{Bunp}}$ п'єзотрансформатор повинен передавати потужність

$$P_{nT}=3 \text{ Вт}$$

Вихідна напруга при цьому

$$U_{\text{вх}} = \sqrt{P_{nT} \cdot R_{\text{нхх}}} = 23,8 \text{ В}$$

Необхідний коефіцієнт трансформації ПТ визначається виходячи з мінімального вхідного напруги.

$$K'_u = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{нхх}}} = 0,274$$

Враховуючи можливий технологічний розкид при виготовленій ПТ, вплив кріплень на роботу ПТ, а також деякі зниження K_u з температурою (для кераміки VA-800 в діапазоні температур - 20 ÷ 60°C зміна K_u складає в середньому + 0,125% на градус) для розрахунку беремо величину K_u з 10% запасом.

$$K_u = 1,1 \cdot K'_u = 0,3$$

Таким чином, п'єзотрансформатор для перетворювача напруги повинен відповідати таким вимогам:

Вхідна напруга	105 – 132 В
Коефіцієнт трансформації на резонансній частоті	0,3
Вихідна потужність	3 Вт
Опір навантаження по змінному струму	301 Ом

2. Для виготовлення п'єзотрансформатора потрібно підібрати кераміку яка буде відповідати найважливішому критерію, а саме добротності яка буде більше ніж 500. З таблиці 1. Для трансформатору підходить 4 кераміки: VA-800, VA-400, VA-200, VA-100. Оскільки ми не знаємо на скільки зміниться добротність після довготривалого нагрівання, виберемо матеріал, з найбільшою добротністю VA-800.

$$\varepsilon_{33}^T = 900 \pm 100$$

$$Q_m = 1300$$

$$Y_1^E = 0,86 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$$

$$N_f = 1700 \pm 1800 \text{ Гц} \cdot \text{м}$$

$$\bullet = 0,37$$

$$\bullet K_{33v} = 0,48$$

$$P_{\text{уд.пр}} = 15 \pm 70 \text{ Вт/см}^3$$

$$E_{\text{пр}} = 80 \pm 100 \text{ В/мм}$$

Виходячи з величини граничної напруженості $E_{\text{пр}}$ визначимо мінімально допустиму товщину вихідній секції (а отже, і товщину ПТ) і мінімальна відстань між електродами збудника. Для розрахунку ПТ задамося робочою частотою $f_p < 200 \text{ кГц}$, товщиною п'єзопластини $d = 0,6 \text{ мм}$. Якщо вибрати робочу частоту 175-180 кГц, то довжина напівхвильової секції

$$b_{r/2} = \frac{N_f}{f_p} \approx 10 \text{ мм}$$

Або, якщо задамося шириною $b = 2b_{r/2} = 20 \text{ мм}$, то резонансна частота ПТ при порушенні другої моди

$$f_p = \frac{N_f}{b_{r/2}} = 2 \cdot \frac{N_f}{b} \approx 175 \text{ кГц}$$

Щоб при поляризації не виникало перенапруження і місцевого перегріву на ізолюючому проміжку, ширина його до на бути не менше товщини пьезоелемента. Враховуючи ці вимоги, вибираємо ширину ізолюючого проміжку $b_{из} = 0,7$ мм. Таким чином, конструкція п'єзотрансформатора для перетворювача напруги має наступні параметри.

Габаритні розміри	$\ell \times b \times d = (30 \times 20 \times 0,6) \text{ мм}$
Відстань між вхідними електродами	$b_1 = 3,5 \text{ мм}$
Ширина вихідних електродів	$b_2 = 9,8 \text{ мм}$
Ширина ізолюючого проміжку	$b_{из} = 0,7 \text{ мм}$

3.2. Вимірювання параметрів п'єзотрансформатора

Під час виконання дипломної роботи були проведені вимірювання характеристик п'єзоелектричного трансформатора та зроблений аналіз отриманих даних. В якості досліджуваного зразка слугував прямокутний п'єзокерамічний трансформатор, для злучності та надійності поміщений у саморобний корпус з двох пластинок гетінаксу та з виведеними контактами. Характеристики досліджуваного п'єзотрансформатор:

Розміри $30 \times 20 \times 0,6 \text{ mm}$;

$$\tan \delta_{11} = 0.0050 \times 10^{-2}$$

$$C_{11} = 82,6 \text{ pF};$$

$$C_{22} = 3,79 \text{ nF};$$

$$C_{1'-2'} = 102,8 \text{ pF};$$

$$C_{1'-2} = 103,2 \text{ pF};$$

$$f_{\text{res}} \approx 177 \text{ kHz};$$

$$X_{22} = 1/\omega C_{22};$$

$$X_{22}(177 \text{ kHz}) = 237,37 \text{ } \Omega$$

В якості схеми для вимірювання був використаний розроблений іншим студентом стенд для вимірювання характеристик п'єзоелектричного трансформатора. Схема стенду наведена на рисунку 24.

На вхід був поданий гармонічний сигнал з генератора ГЗ-56/1. До генератора ГЗ-56/1 для точного визначення частоти генерованного сигналу був підключений частотомір ЧЗ-33. Також до стенду були підключенні вольтамперметри В7-16 на вході схеми та В7-21А на навантаженні. Також паралельно В7-21А підключений осцилограф. Номінали компонентів схеми становлять: $R_1 = 0.49 \Omega$; $C_1 = 4.7 \text{ } \mu\text{F}$; $R_n = 250 \text{ } \Omega$

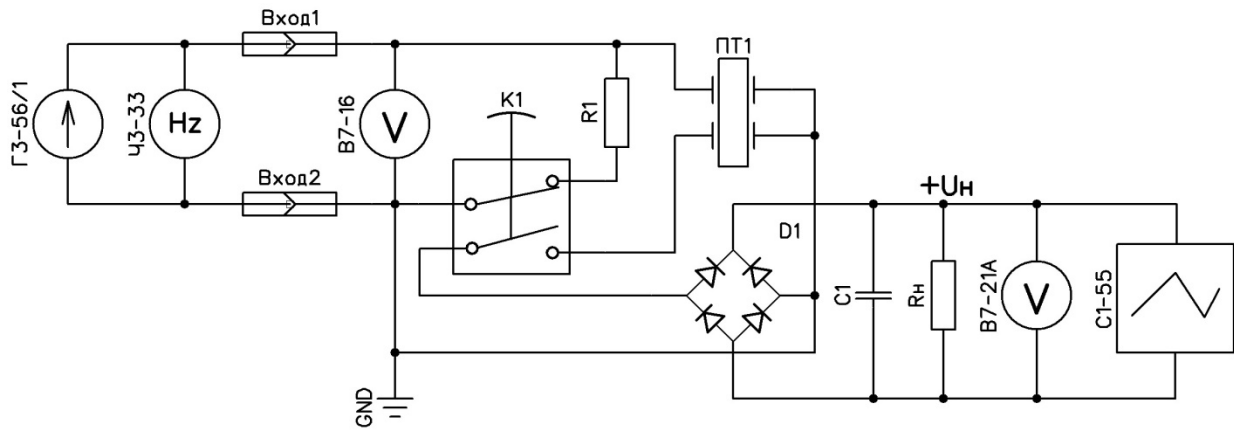


Рисунок 15. Схема стенду для вимірювання характеристик п'єзотрансформатора.

Спочатку були виміряні основні характеристики досліджуваного п'єзотрансформатор, що наведені вище, а потім на основі цих характеристик було розраховане R_n . Потім була виміряна і побудована частотна характеристика п'єзотрансформатор у широкому діапазоні. Для вимірювання частотних характеристик від стенду був від'єднаний діодний мост та конденсатор, і навантаження було підключене до п'єзотрансформатор напряму, як вказано на рис. 25. Під час вимірювань $U_{вх} = 50 \text{ В}$.

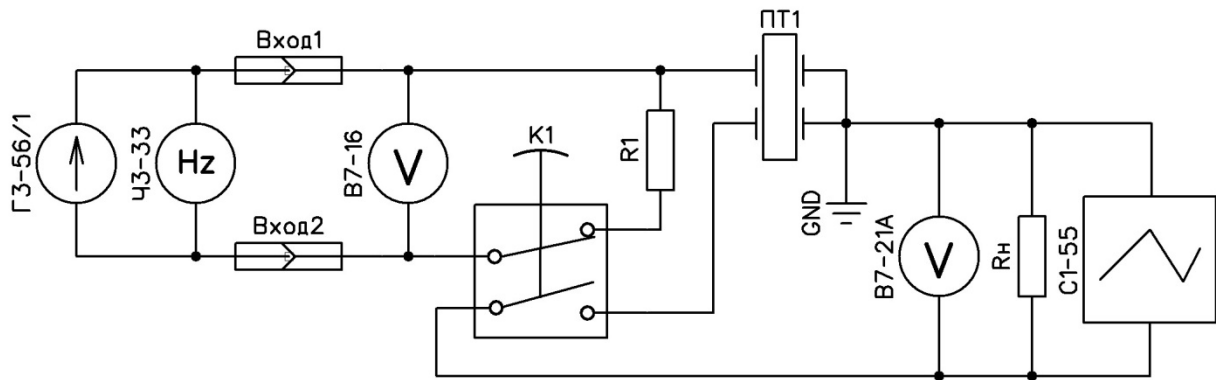


Рисунок 16. Схема стенду для вимірювання частотних характеристик п'єзотрансформатора.

Під час проведених вимірювань було виявлено, що окрім основної резонансної частоти у п'єзокерамічного матеріалу існує ще декілька резонансних піків. А саме потужний резонанс на 60,26 кГц (так звана 2 мода) та ще 4 великих резонанси на проміжку від 49 до 93 кГц. Зазначу, що частотна характеристика на проміжку від 40 до 120 кГц є нелінійною, а значення резонансних частот мають дуже вузький діапазон (приблизно 0,2 кГц) та можуть змінюватися від максимуму до мінімуму у межах 0,5 кГц. Тобто керувати п'єзотрансформатор на таких частотах дуже складно. У діапазоні від 120 до 160 кГц частотна характеристика набула майже лінійного вигляду на поступово зростаючі від 1 до 1,5 Вольт. Після цього були проведені вимірювання у діапазоні від 160 до 190 кГц для визначення резонансної частоти п'єзотрансформатор.

Під час проведених вимірювань було виявлено, що окрім основної резонансної частоти у п'єзокерамічного матеріалу існує ще декілька резонансних піків. А саме потужний резонанс на 60,26 кГц (так звана 2 мода) та ще 4 великих резонанси на проміжку від 49 до 93 кГц. Зазначу, що частотна характеристика на проміжку від 40 до 120 кГц є нелінійною, а значення резонансних частот мають дуже вузький діапазон (приблизно 0,2 кГц) та

можуть змінюватися від максимуму до мінімуму у межах 0,5 кГц. Тобто керувати п'єзотрансформатор на таких частотах дуже складно. У діапазоні від 120 до 160 кГц частотна характеристика набула майже лінійного вигляду на поступово зростаючі від 1 до 1,5 Вольт. Після цього були проведені вимірювання у діапазоні від 160 до 190 кГц для визначення резонансної частоти п'єзотрансформатор.

З'ясувалося, що резонансна частота п'єзотрансформатор для $R_n = 250 \Omega$ дорівнює 177,5 кГц. Зазначу, що на цьому проміжку характеристика є більш плавною, порівнюючи з попередніми вимірюваннями. Відстань від максимуму до мінімуму складає щонайменше 3,5 кГц. Також у межах 0,5 кГц від резонансної частоти вихідна напруга має значення, дуже близькі до резонансних. Ці властивості п'єзотрансформатор покращують його роботу у схемі живлення та розширюють діапазон частот, які можна подати на п'єзотрансформатор, щоб на виході отримати приблизно сталі значення трансформованої напруги. Також зазначу, в залежності від зміни R_n змінюється і резонансна частота п'єзотрансформатор, тому потрібно перевіряти її для кожного підключення.

Головною метою всіх вимірів було з'ясувати на скільки буде змінюватися добротність вибраного нами п'єзотрансформатора. Після нагрівання до температури до 140-160 $^{\circ}\text{C}$ протягом 5 хвилин та зняття всіх показників порівняли початкову виміряну добротність з отриманою, а саме $Q=824$. Отже бачимо, що, поточна добротність менша від початкової на $\approx 36\%$.

Це свідчить про те що, при приближенні температури нагрівання п'єзоелемента до точки Кірі параметри та характеристики погіршуються, а при переході температури цієї точки- зникання п'єзовластивостей матеріалу.

Висновки

Розвиток п'єзотрансформаторів обумовлений тим, що, вони набагато компактніші ніж звичайні трансформатори, оскільки їм не потрібні ніякі додаткові обмотки для кількісної зміни напруги або току.

П'єзотрансформатори знаходять широке застосування в сучасній світлотехнічній апаратурі та приладах. Вони дозволяють мінімізувати габарити пристроїв запалення і живлення різного класу газорозрядних ламп, створювати високоефективні високочастотні джерела живлення з ККД до 95%, які забезпечують підвищення довговічності ламп в 5-10 разів і світловіддачу більш ніж в 1,4 рази.

П'єзоелектричні трансформатори широко застосовуються в радіoeлектроніці. Відсутність у ПТ обмоток і магнітної системи, можливість застосування планарної конструкції, висока економічність і надійність істотно поліпшують масогабаритні льше застосування ПТ знаходять в високовольтних джерелах вторинного електроживлення (ДВЕЖ) і в пристроях, де потрібний великий коефіцієнт перетворення напруги, зокрема, в медичній техніці.

Оскільки п'єзоелементи чутливі до температури, практично дізналися які зміни відбулися під час довгого нагрівання п'єзотрансформатора і для коректної роботи такого пристрою краще брати матеріал з урахування зменшення його добротності до 40% оскільки температура наближується до точки Кюрі.

Список використаної літератури

1. Ranier Clement Tjiptoprodjo. On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms.- Saskatchewan, Canada.: University of Saskatchewan Saskatoon, April 2005
2. Й.Крауткремер, Г.Крауткремер. Справочник. Ультразвуковой контроль материалов.-Москва.: Металлургия, 1991.
3. David H. Johnson. Simulation of an ultrasonic piezoelectric transducer for NASA/JPL Mars rover.- PA, USA.: Cybersonic, Inc. of Erie, 2003.
4. www.piezo.com
5. ГОСТ 11 0444-87 «Материалы пьезокерамические»
6. Tokin. Multilayer Piezoelectric Actuators. User's Manual, Tokin Corporate Publisher.: 1996.
7. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Т.І. Механика.- Москва.:1979.
8. Голямина И.П. Ультразвук.-Москва.: из-во «Советская энциклопедия», 1979
9. Jan Tichy, Jiry Erhart, Erwin Kittinger, Jana Privratska. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics.- Heidelberg, Dordrecht, London, New York.: Springer, 2010
- 10.С.А. Гриднев. Физика пьезоэлектрических кристаллов: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун – т, 2001. 123с.
- 11.Л.И. Янченко. Физическое материаловедение: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун – т, 2005. 207с.
- 12.С.А. Гриднев, Л.Н. Коротков. Введение в физику неупорядоченных полярных диэлектриков: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун – т, 2003. 200с.

- 13.С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. Москва, изд. «Металлургия», 1988. 578с.
- 14.Интернет источник. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезокерамика>
- 15.«Piezoelectric transformer based power converters; design and control»
Martin Scholer Rodgaard, Michael A. E. Andersen, Erik Bruun; Technical University of Denmark
- 16.«Дослідження характеристик п'єзоелектричних трансформаторів» Ю.Е. Паеранд, канд. техн. наук, Д.А. Кривошей; УДК621.38
- 17.Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975.
- 18.Вітебський завод радіодеталей «Моноліт». – Режим доступу: <http://www.monolit.by/>. – Заголовок з екрану. – 10.01.2010.
- 19.Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлек-тронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. – СПб.: Политехника, 1994.
20. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика: Пер. с англ.; Под ред. д-ра физ.-мат. наук Л.А. Шувалова. – М.: Мир, 1974.